



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PŘEPLŇOVÁNÍ ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

SUPERCHARGING OF SPARK IGNITION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Májek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Ondřej Májek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přepřínování zážehových motorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem práce je komplexní studium možností přepřínování zážehových motorů k dosažení lepších výkonových a provozních parametrů.

Cíle bakalářské práce:

Ucelený přehled možností přepřínování zážehových motorů, včetně vlastního kritického zhodnocení jednotlivých přístupů.

Seznam doporučené literatury:

BARTONÍČEK, L. Přepřínování pístových spalovacích motorů, 1. vyd., Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2004, 77 s., ISBN 80-7083-800-0.

STONE, R. Introduction to Internal Combustion Engines, 3rd edition, Hampshire, Palgeave, 1999, 641 s. ISBN: 0-333-74013-0.

ABSTRAKT

Práce uvádí základní pojmy, možnosti a jednotlivá konstrukční řešení přepínání zážehových motorů. Uvádí výhody a nevýhody jednotlivých řešení a vlastní zhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Turbodmychadlo, přepínaný zážehový motor, turbína, kompresor

ABSTRACT

The work presents basic terms, options and construction solutions of turbocharged petrol engines. This work also contains positives and negatives of each construction solution and my evaluation.

KEYWORDS

Turbocharger, turbocharged petrol engine, turbine, compressor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MÁJEK, Ondřej *Přepřínování zážehových motorů*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Zdeněk Kaplan.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Kaplana CSc. s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Ondřej Májek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval panu doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi za jeho velkou ochotu a cenné rady, které mi poskytl při psaní této bakalářské práce. Také bych rád poděkoval své rodině, která mi byla během celého studia velkou podporou.

OBSAH

1	Úvod	8
2	Zážehový motor	9
2.1	Činnost zážehového motoru	9
2.2	Výkon motoru	12
3	Přepřňování	14
3.1	Hlavní veličiny	14
3.2	Přepřňované zážehové motory	15
4	Kompresory užívané k přepřňování	16
4.1	Objemová rotační dmychadla	16
4.1.1	Rootsovo dmychadlo	17
4.1.2	Lysholmovo dmychadlo	18
4.2	Proudová dmychadla	19
4.2.1	Radiální kompresory	19
5	Turbodmychadla	20
5.1	Konstrukce turbodmychadla	21
5.2	Regulace	24
5.2.1	Regulace obtokovým ventilem	25
5.2.2	Regulace změnou geometrie lopatek	26
6	Chlazení plnicího vzduchu	27
7	Poruchy turbodmychadel	28
7.1	Nedostatečné mazání	28
7.2	Vnik cizího tělesa	30
8	Specifické způsoby přepřňování	31
8.1	Dvoustupňové přepřňování	31
8.2	Systém comprex	32
9	Závěr	33

1 ÚVOD

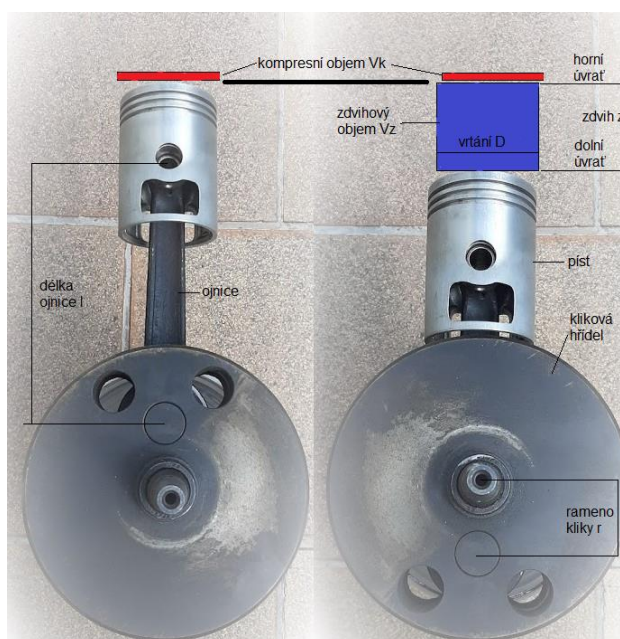
Téma přeplňování zážehových motorů jsem si vybral hned z několika důvodů. Motory a obecně auta jsou mým koníčkem, a proto jsem chtěl do této oblasti nahlédnout hlouběji. Dalším důvodem byla snaha zvýšit obecné povědomí o této problematice u laické veřejnosti. První část této práce je věnována přiblížení obecné problematiky zážehových motorů, a to principům fungování a výhodám, které přináší jejich přeplňování. Změny, které přináší přeplňování budou ilustrovány na p-V a T-S diagramech vytvořených v programu Geogebra. Následně se zabývám jednotlivými konstrukčními řešeními a jejich využíváním v praxi. Zvláštní část práce se týká turbodmychadel, u kterých se podrobněji zaměřuji na konstrukci, použití a případné poruchy v provozu. Závěrem provádím vlastní kritické zhodnocení jednotlivých konstrukčních řešení.

2 ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Teoretickým základem zážehového motoru je ideální termodynamický oběh s izochorickým přívodem tepla, nazývaný také Ottův oběh. Jedná se o oběh teoretický a uzavřený, což znamená, že pracovní médium neopouští válec. Předpokládáme děj s ideálním plynem. Spalování je nahrazeno nekonečně rychlým izochorickým přívodem tepla. Výfuk, který je u reálného motoru spojen s odvodem tepla je nahrazen nekonečně rychlým izochorickým odvodem tepla. Válec je dokonale tepelně izolován, a tím nedochází k výměně tepla mezi válcem, pracovním médiem a okolím.

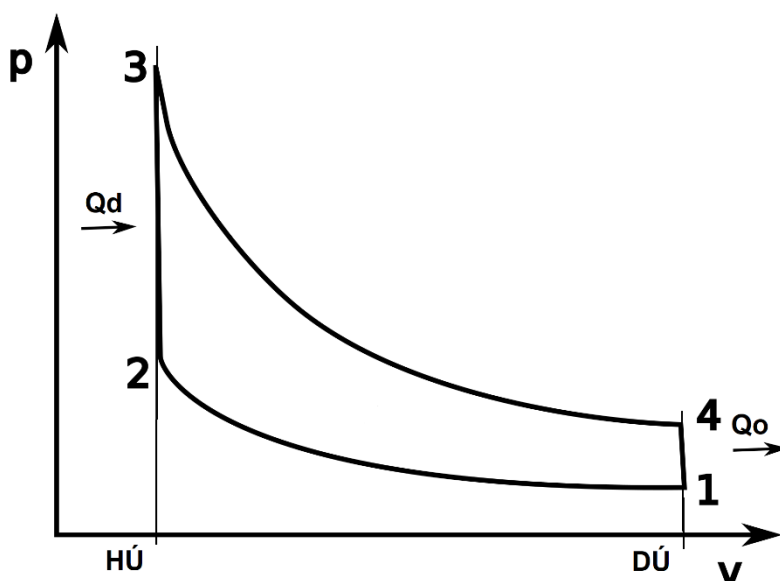
2.1 ČINNOST ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Pro pochopení teorie, na základě které, je popisováno fungování zážehového motoru je třeba zavést základní pojmy a vztahy mezi jednotlivými veličinami.



Obr. 2.1 Kliková hřídel s pístem (archiv autora)

Na obrázku č. 1.1 je vidět kliková hřídel s pístem jednoválcového motoru. Píst má ve válci dvě základní polohy. V levé části obrázku se píst nachází v nejvyšším bodě nazývaném horní úvrať. Objem, který je v tomto okamžiku nad pístem se nazývá kompresní objem V_k , a je roven objemu V_2 . Tlak, který na píst působí se v p-V diagramu ideálního cyklu značí p_2 . V pravé části obrázku č. 1.1 je vidět píst, který se nachází v nejnižším bodě nazývaném dolní úvrať. Celý objem válce, který se v tomto okamžiku nachází nad pístem se nazývá celkový objem V_1 , je součtem zdvihového objemu V_z , a kompresního objemu V_k . Tlak, který se v této pozici působí na píst se značí p_1 . [2]



Obr. 2.2 Ottův oběh

Stupeň komprese, nebo též kompresní poměr, vyjadřuje poměr mezi objemem válce v dolní úvratí a objemem válce v horní úvratí.

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{(V_k + V_z)}{V_k}$$

Stupeň zvýšení tlaku při kompresi udává poměr mezi tlakem, který je ve válci při poloze pístu v horní úvratí a tlakem při poloze pístu v dolní úvratí.

$$\psi = \frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^\kappa$$

Stupeň zvýšení tlaku při izochorickém přívodu tepla.

$$v = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = 1 + \frac{Q_d}{mc_v T_2}$$

Stupeň expanze, nebo též expanzní poměr. Pro Ottův cyklus platí, že stupeň expanze δ se rovná stupni komprese ε .

$$\delta = \frac{V_4}{V_3}$$

Izochoricky přivedené teplo do cyklu z kalorimetrické rovnice $Q = m c_v \Delta T$, kde m je hmotnost pracovní látky, c_v je měrná tepelná kapacita za konstantního objemu a ΔT je rozdíl teplot na počátku a na konci děje.

$$Q_d = Q_{23} = mc_v(T_3 - T_2)$$

Izochoricky odvedené teplo z cyklu.

$$Q_o = Q_{41} = mc_v(T_1 - T_4)$$

Hodnoty jednotlivých veličin v charakteristických bodech lze dopočítat pomocí vztahů platných na základě jednotlivých termodynamických dějů.

$$p_1 \quad T_1$$

$$p_2 = p_1 \varepsilon^\kappa \quad T_2 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1}$$

$$p_3 = p_1 \varepsilon^\kappa v \quad T_3 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} v$$

$$p_4 = p_1 \varepsilon^\kappa v \varepsilon^{-\kappa} \quad T_4 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} v \varepsilon^{1-\kappa}$$

Účinnost Ottova cyklu lze na základě vztahů mezi jednotlivými veličinami v charakteristických bodech odvodit.

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{(Q_d - |Q_o|)}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_o|}{Q_d} = 1 - \frac{mc_v(T_4 - T_1)}{mc_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = \\ &= 1 - \frac{(T_1 v - T_1)}{T_1 \varepsilon^{\kappa-1} v - T_1 \varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{T_1(v-1)}{T_1 \varepsilon^{\kappa-1}(v-1)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \end{aligned}$$

$$\eta_{tOttO} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

Celkový výkon motoru lze ovlivnit změnou hlavních parametrů oběhu, jako je stupeň komprese, stupeň zvýšení tlaku při kompresi, přivedením většího množství tepla a další. Každá tato změna má však svá omezení v praxi. Proto je snahou nalézt optimální poměr mezi hlavními veličinami, aby bylo dosaženo co nejlepší účinnosti a zároveň co největší práce kterou cyklus vykoná [2].

2.2 VÝKON MOTORU

Efektivní výkon, kterého lze dosáhnout u spalovacího pístového motoru je dán vztahem [1]:

$$P_e = i V_z p_e \frac{n}{\tau} \quad [\text{W}] \quad (1)$$

P_e [W] efektivní výkon

i [-] počet válců spalovacího motoru

V_z [m³] zdvihový objem jednoho válce

p_e [Pa] střední efektivní tlak na píst je neexistující, teoreticky vypočtený tlak, který by působil na píst po celou dobu expansního zdvihu tak, aby poskytl stejnou práci jako proměnný skutečný tlak. Hodnota středního efektivního tlaku je po celou dobu zdvihu konstantní.

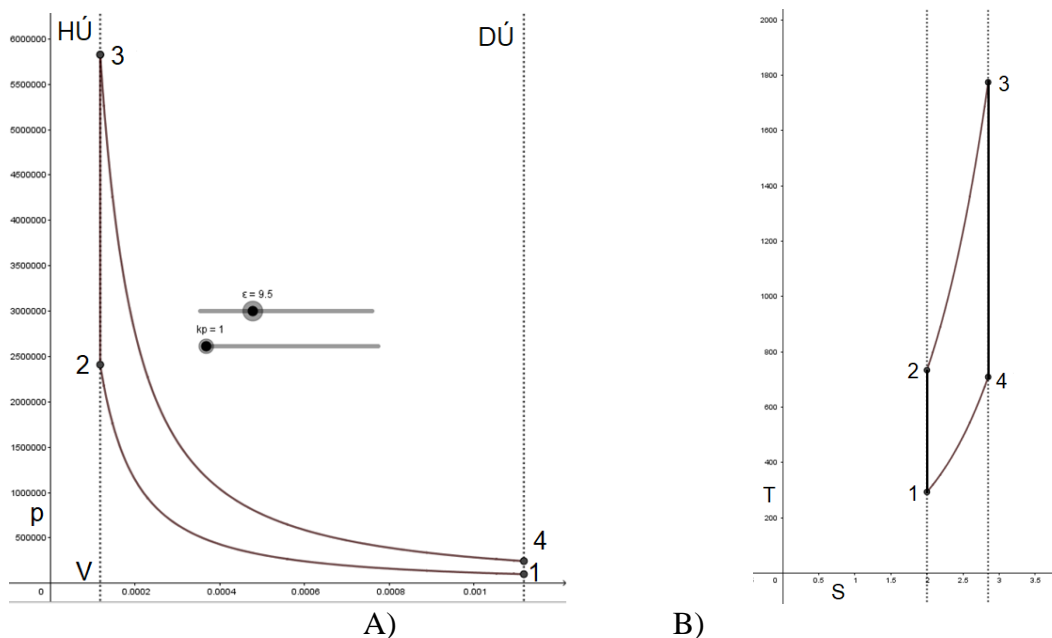
n [Hz] otáčky motoru

τ [-] otáčkový činitel, který vyjadřuje počet otáček, během kterých nastane jeden expansní zdvih, pro dvoudobý motor $\tau = 1$, pro čtyřdobý $\tau = 2$.

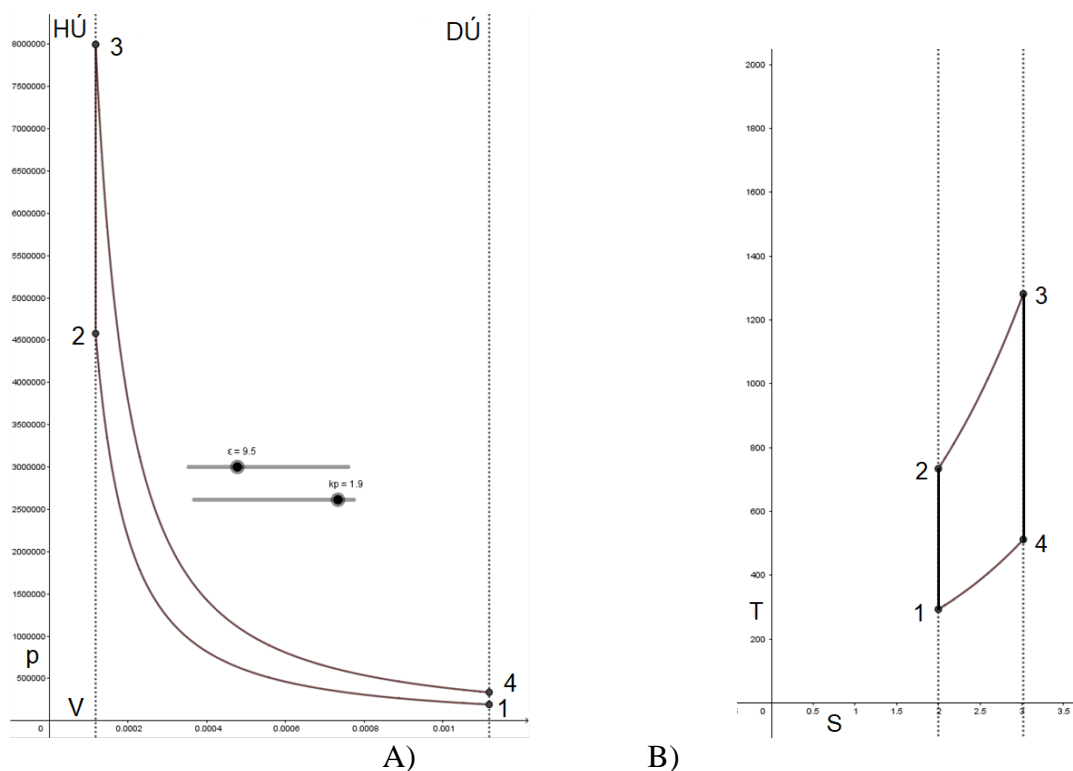
Z uvedeného vztahu lze vyvodit, že většího výkonu spalovacího motoru lze docílit zvýšením počtu válců. Toto řešení ovšem není praktické, jak z hlediska velikosti výsledného motoru, tak z hlediska výrobních nákladů. Další možností je zvýšení objemu válce, které má ovšem opět negativní vliv na velikost motoru a na hospodárnost jeho provozu. Další způsob, jak docílit většího výkonu je zvýšení počtu otáček motoru, které má ovšem opět své limity dané například konstrukcí motoru nebo použitými materiály a jejich přiměřeným opotřebením. Nejvíce využívanou cestou, jak docílit lepších vlastností je zvýšení středního efektivního tlaku. To přímo souvisí s přeplňováním, neboť při zvýšení středního efektivního tlaku lze do válce dopravit větší množství paliva, při jehož hoření se uvolní více energie, a tím je dosaženo i většího výkonu motoru. [3]

V této práci se dále věnuji možnostem zvyšování výkonu motorů jejich přeplňováním.

Následující grafy ilustrují, jak se změní p - V a T - S diagram Ottova cyklu v případě, že je nasáván vzduch o atmosférickém tlaku, nebo je tlak v sání zvýšen. V případě cyklu s vyšším, než atmosférickým tlakem se zejména izochorický přívod tepla koná za výrazně vyššího tlaku, z čehož plyne, že i celková práce vykonaná cyklem je větší.



Obr. 2.3 A) p - V diagram Ottova oběhu bez přehřívání, B) T - S diagram Ottova oběhu bez přehřívání



Obr. 2.4 A) p - V diagram Ottova oběhu s přehříváním, B) T - S diagram Ottova oběhu s přehříváním

3 PŘEPLŇOVÁNÍ

Základní myšlenkou je dopravit do válce větší množství vzduchu, než by si byl motor schopen nasát sám a dosáhnout stavu tzv. přeplnění. S přeplňovaným motorem lze dosáhnout vyšších výkonů než s motorem atmosférickým, a to při stejné zdvihovém objemu. Díky přeplňování lze částečně odstranit i některé neduhy zážehových motorů. Lze například dosáhnout zvýšení krouticího momentu při nižších pracovních otáčkách motoru. Lze také dosáhnout nižší měrné efektivní spotřeby paliva, snížit emise. Výhodou je i schopnost kompenzace výkonu ve vyšších nadmořských výškách oproti atmosférickému motoru. Metod, kterými lze motory přeplňovat je celá řada.

Základní rozdělení je na přeplňování vlastní - neboli vnitřní a přeplňování cizí - neboli vnější. Vlastní přeplňování využívá dynamických účinků nasávaného vzduchu v sacím potrubí. Střídavé otevírání a zavírání sacích ventilů má za následek vznik tlakových vln v sacím potrubí. V případě, že tlaková vlna dorazí k otevřenému ventilu, dojde k většímu naplnění válce, než by došlo při pouhém sání. Pro správnou funkci tohoto systému přeplňování v širokém spektru otáček motoru je třeba přizpůsobovat délku sacího potrubí podle otáček motoru.

Cizí přeplňování je realizováno použitím rotačního stroje s lopatkami, který stlačuje nasávaný vzduch a za zvýšeného tlaku jej dopravuje do válce motoru. Jsou dvě základní varianty pohonu tohoto zařízení. První pomocí cizího zdroje mechanické energie, například elektromotorem. Toto řešení se využívá u velkých motorů. Druhou možností je pohon od vlastního spalovacího motoru. Zde jsou opět dvě základní možnosti pohonu. První možností je pohon pomocí turbíny, kterou roztáčí výfukové plyny odcházející značnou rychlostí z motoru. Druhou možností je mechanické spojení lopatkového kola s klikovou hřídelí motoru. Technologie přeplňovaných motorů má ovšem i svá negativa. Celý motor je vystaven větší tepelné a tlakové zátěži, z čehož vyplývá, že musí být kladen důraz na vysokou kvalitu použitých materiálů. Přeplňovaný motor je i konstrukčně složitější a jeho výroba nákladnější. [2,3]

3.1 HLAVNÍ VELIČINY

Hltnost motoru

Hltností motoru rozumíme celkový hmotnostní tok vzduchu, který je do motoru dodáván kompresorem. Tento lze dále rozdělit na hmotnostní tok, který zůstává uzavřen ve válci, nazývaný též spalovací tok. Druhý hmotnostní tok je proplachovací, který má za úkol proplach spalovacího prostoru během překřížení ventilů. [3]

$$m_K = m_Z + m_{pr} \quad [\text{kg s}^{-1}]$$

m_K $[\text{kg s}^{-1}]$ hmotnostní tok vzduchu dodaného kompresorem

m_Z $[\text{kg s}^{-1}]$ spalovací hmotnostní tok

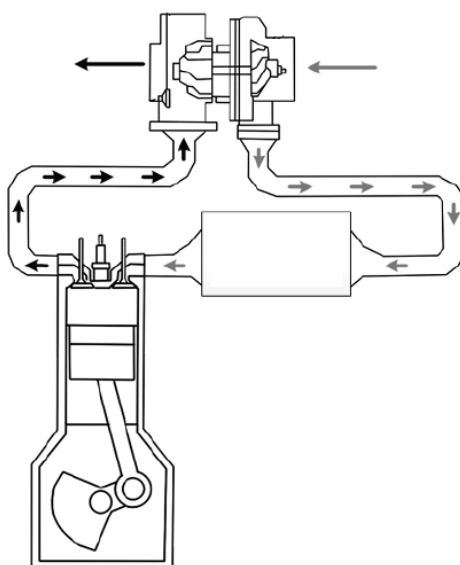
m_{pr} $[\text{kg s}^{-1}]$ proplachovací hmotnostní tok

Plnicí tlak

Plnicí tlak ve velké míře ovlivňuje spalovací cyklus motoru, který je přeplňován. Velikost plnicího tlaku ovlivňuje výsledný kompresní poměr motoru. Kompresním poměrem rozumíme poměr tlaků ve válci mezi dolní a horní úvratí pístu. Zvýšení plnicího tlaku má tedy za následek celkové zvýšení provozních tlaků, při kterých motor pracuje. S tímto je třeba počítat při navrhování motoru a při volbě použitých materiálů. Je výhodné použít mezichladiče stlačeného vzduchu, pomocí kterého dojde ke snížení teploty plnicího vzduchu před jeho vstupem do motoru. [3]

3.2 PŘEPLŇOVANÉ ZÁŽEHOVÉ MOTORY

Zážehové motory mají svá určitá specifika v oblasti přeplňování. Hlavním cílem je zvýšit jejich výkon při současném zabránění vzniku detonačního spalování, ke kterému by došlo, kdyby se pouze zvyšoval kompresní poměr. Detonační spalování vzniká nadměrným stlačením směsi, při kterém dojde k ohřátí paliva nad samozápalnou teplotu. Dojde ke vzniku nekontrolovaného hoření směsi, kde rychlost tohoto hoření je mnohonásobně vyšší než rychlost hoření řízeného. Detonační spalování značně tepelně a mechanicky namáhá části motoru, jako jsou ložiska ojnice a písty. Zážehové motory je možné rozdělit na benzinové a plynové. Méně náchylné k detonačnímu spalování jsou motory, které využívají plynné palivo. To je dáno vlastnostmi paliva, jež má z pravidla vyšší oktanové číslo. V běžné praxi se ovšem využívají více motory benzinové. Proto bude pozornost věnována výčtu možností, s pomocí kterých lze detonační spalování eliminovat. Je možné použít palivo s vyšším oktanovým číslem, provozovat motor s bohatší směsí paliva a vzduchu. Optimalizovat vhodným způsobem spalovací prostor, aby se svým tvarem co nejvíce blížil polokouli. Změnit nastavení předstihu zapalování, nebo intenzivně rozvířit směs pomocí antidetonační šterbiny. [2]



Obr. 3.1 Schéma přeplňovaného motoru [5]

4 KOMPRESORY UŽÍVANÉ K PŘEPLŇOVÁNÍ

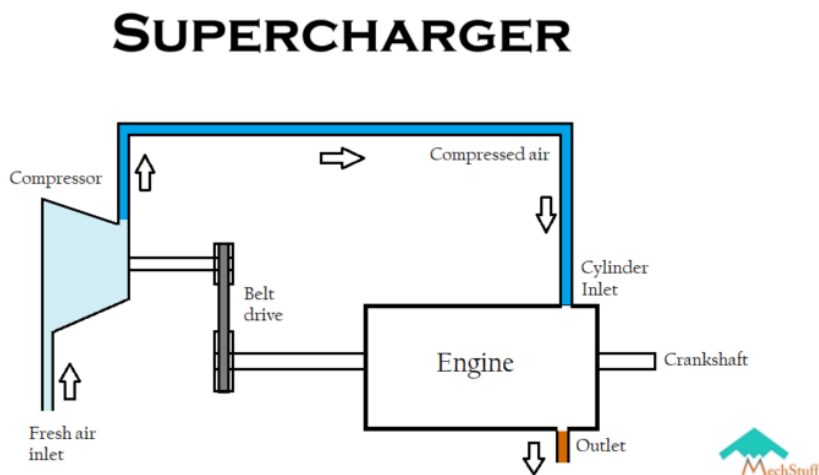
Zařízení, která jsou užívána k přeplňování, je možné rozdělit do těchto základních skupin.

Objemová dmychadla jsou poháněna mechanicky přímo od motoru. Do této skupiny jsou zařazena dmychadla pístová a rotační objemová.

Proudová dmychadla, která mohou být poháněna mechanicky od motoru nebo pomocí proudu spalín z motoru. Tuto skupinu lze dále rozdělit na dmychadla axiální a radiální.

4.1 OBJEMOVÁ ROTAČNÍ DMYCHADLA

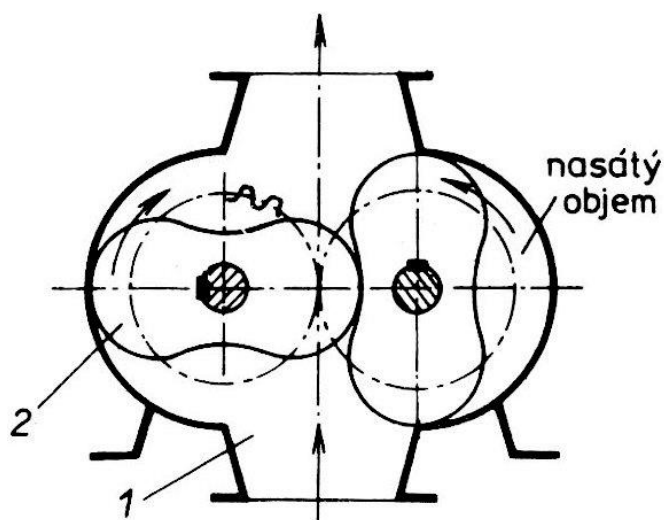
Mechanicky poháněná objemová dmychadla mají několik výhod. Patří mezi ně jejich rychlá reakce na změnu zatížení motoru, nebo na změnu otáček motoru. Další výhodou jsou podstatně menší rozměry oproti dmychadlům pístovým. Nevýhodou mechanicky poháněných dmychadel představuje fakt, že zhoršují mechanickou účinnost motoru, který je přeplňován. Zhoršení účinnosti je způsobeno příkonem, který je odebírán motoru pro pohon dmychadla a v neposlední řadě i ztrátami v pružných členech a spojkách, které jsou součástí pohonu. Objemová rotační dmychadla jsou používána pro čtyřdobé motory méně než turbodmychadla. Jsou používána v automobilech se sportovním charakterem. Nejvíce využívaná objemová rotační dmychadla jsou Rootsova a Lysholmova. [3]



Obr. 4.1 Schéma přeplňování mechanickým kompresorem [5]

4.1.1 ROOTSOVO DMYCHADLO

Rootsovo dmychadlo je díky tvaru svých rotorů také někdy označováno za dmychadlo zubové. Je řazeno do skupiny kompresorů s vnější kompresí. Ke stlačení vzduchu dochází v jednom okamžiku při spojení mezizubového prostoru s výtlačným kanálem, což má za následek zvýšenou hlučnost dmychadla. Předností tohoto dmychadla je malá závislost celkové účinnosti na otáčkách. Zároveň dodávka vzduchu je otáčkám přímo úměrná. Celková účinnost je ovšem velmi ovlivněna vzájemnými vůlemi mezi rotory dmychadla a jeho skříní. Skříň dmychadla je z hliníkové slitiny nebo při větších rozměrech dmychadla může být vyrobena z litiny. Skříň je pro větší tuhost a lepší chlazení žebrovaná. Rotory tvoří hliníkové odlitky, které mohou být odlité přímo na hřídele, nebo na nich být nalisovány. Tvar rotorů jednotlivých dmychadel se může lišit dle použití nebo výrobce. V minulosti byly rotory dvou a tříkřídle V dnešní době je možné se setkat i s rotory o více křídlech. Nejčastější je tvar odpovídající evolventě, která je podél šroubovice stočena. Rotory jsou uloženy v kuličkových ložiscích. Pro snížení hluku a vibrací je kladen velký důraz na přesné vyvážení rotorů. Pohon mezi rotory je realizován pomocí ozubených kol s rovnými nebo šikmými zuby. Z důvodů velkých setrvačných sil, které působí na rotory, se vkládá do poháněcího systému pružný člen, aby se předešlo případnému poškození. Pro správné fungování celého dmychadla je třeba zajistit, aby mezi zuby rotorů a skříní dmychadla byla vždy dostatečná vůle taková, aby nedošlo k dotyku nebo zadření. S rostoucí vůlí klesá ovšem celková účinnost. Z toho vyplývá, že vzájemné vůle musí být velmi malé, a proto jsou na výrobu rotorů i skříně kladeny vysoké nároky na přesnost. Otáčky, při kterých může Rootsovo dmychadlo pracovat, se pohybují v rozmezí $900 - 11\,000 \text{ min}^{-1}$. Z důvodů velkých nároků na příkon pro pohon dmychadla se dmychadla využívá většinou u motorů disponujících větším objemem U těchto motorů jsou ztráty na pohon dmychadla vzhledem k celkovému výkonu téměř zanedbatelné. V situaci, kdy není využíván plný výkon motoru a není tudíž potřebný i plný tok vzduchu z dmychadla je tento přebytečný vzduch odváděn obtokovým ventilem. [3]



Obr. 4.2 Schéma Rootsova dmychadla [6]

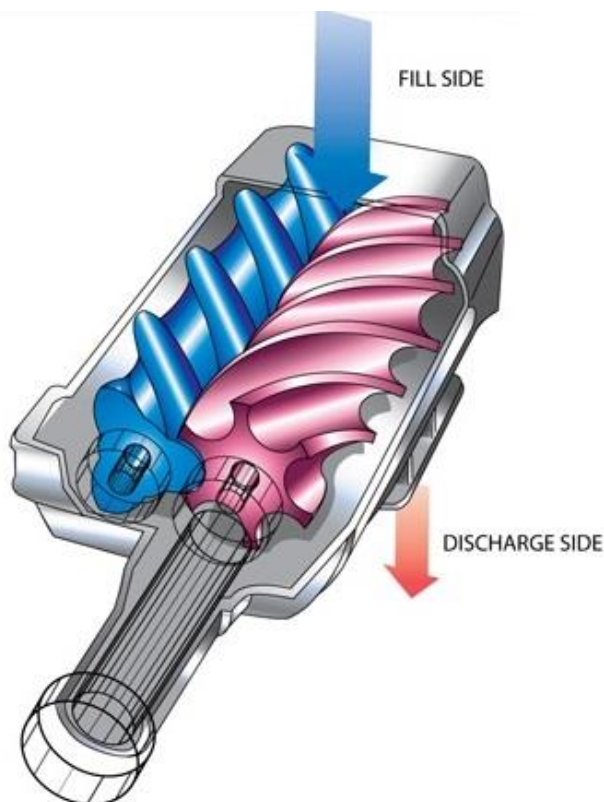
V současnosti nejsou Rootsova dmychadla zdaleka tak hojně využívána jako turbodmychadla. Ovšem díky novým technologiím, které odstraňují alespoň částečně jejich hlavní nevýhody je někteří výrobci stále používají. Dalším důvodem, proč jsou využívány málo, je znatelně vyšší cena v porovnání s turbodmychadly. Jako příklad evropského výrobce, který k přeplňování motoru zvolil právě Rootsovo dmychadlo je možné uvést Audi s jejich motorem 3,0 TFSI.



Obr. 4.3 Rootsovo dmychadlo [7]

4.1.2 LYSHOLMOVO DMYCHADLO

Lysholmovo dmychadlo na první pohled velmi připomíná dmychadlo Rootsovo, ovšem oproti jemu má řadu odlišností v konstrukci. Celek opět tvoří skříň, ve které jsou v ložiscích umístěny dva rotory. Hlavní rozdíl oproti Rootsovu dmychadlu je v tom, že rotory nejsou stejné, ale mají rozdílný průřez. Lze říct, že do sebe doslova zapadají a mají svůj profil výrazně více stočený do šroubovice. Vzduch procházející dmychadlem dosahuje vysokého stlačení, což má za následek velké nároky na tuhost skříně, ve které jsou rotory uloženy. Samozřejmostí jsou i velké požadavky na přesnost a minimální vůle mezi jednotlivými komponenty, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti. Nevýhodou této koncepce jsou vyšší požadavky na výkon potřebný k pohonu dmychadla i při malé zátěži motoru. Nejčastěji můžeme tento typ dmychadla nalézt u amerických výrobců jako je například Ford, který jej využívá do vozů Mustang. Charakteristický je pro tato dmychadla zvuk při zatíženém motoru, který vydává pronikavé hvízdání. [3]



Obr. 4.4 Lysholmovo dmychadlo [8]

4.2 PROUDOVÁ DMYCHADLA

Proudová dmychadla lze rozdělit dle směru, ve kterém jimi prochází stlačovaný vzduch, na axiální a radiální. Axiální dmychadla se v dnešní době již téměř nevyužívají pro potřeby přeplňování. Je to způsobeno malou schopností dostatečného stlačení v jednom stupni a vícestupňová jsou již pro své rozměry obtížně použitelná a výrobně drahá.

4.2.1 RADIÁLNÍ KOMPRESORY

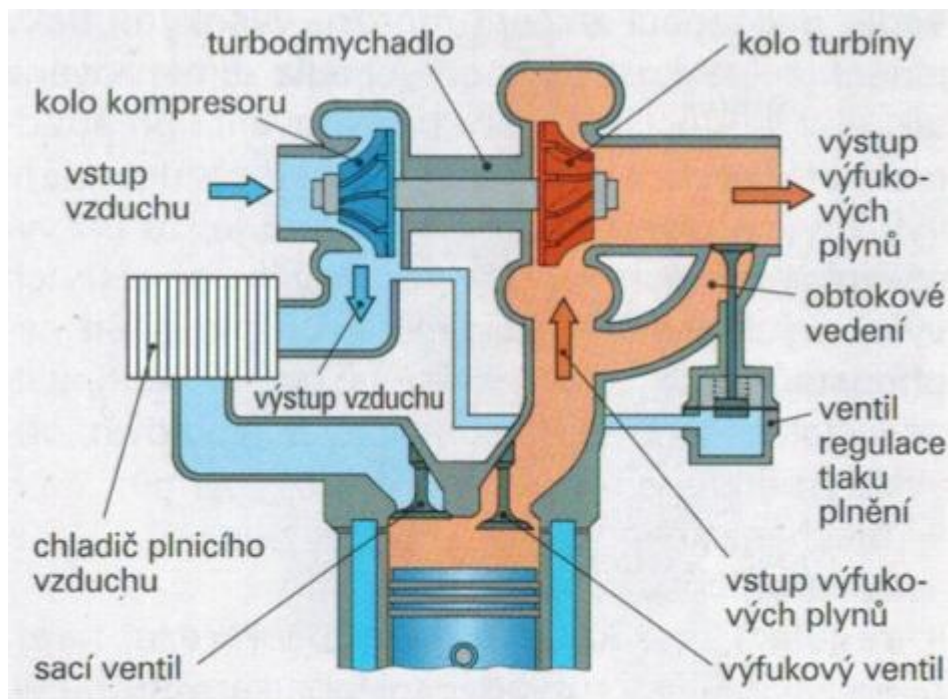
Jsou nejpoužívanějším řešením pro přeplňování motorů. Vděčí za to řadě vlastností, které je činí výhodnějšími pro masové užití v porovnání s ostatními možnostmi. Hlavními důvody jsou: relativně jednoduchá konstrukce, nízké náklady na jejich výrobu a nízká hmotnost. Nevýhodou jejich konstrukce je potřeba vysokých otáček pro správnou funkci. To je důvodem, proč se pro jejich pohon ve valné většině případů nepoužívá mechanických převodů. Ztráty v převodech by byly příliš velké, neboť rozdíl v pracovních otáčkách motoru a kompresoru je značný. Nejlepším řešením je proto pohánět radiální kompresory pomocí turbíny, která je roztáčena proudem spalín z motoru. Tímto řešením vzniká turbodmychadlo. [3]



Obr. 4.5 Radiální kompresor [8]

5 TURBODMYCHADLA

Přeplňování zážehových motorů pomocí turbodmychadel je v současné době nejvíce využívanou metodou. Hlavními důvody jsou jednoduchost konstrukce, kompaktní rozměry a to, že energie potřebná k pohonu se neodebírá motoru, ale je využíváno energie výfukových plynů. Turbodmychadlo se skládá ze dvou základních částí. První jeho část tvoří turbína, která je poháněna proudem spalin a nachází se na jedné hřídeli společně s oběžným kolem kompresoru. Druhou část turbodmychadla tvoří radiální kompresor. Společná hřídel je uložena v kluzném ložisku a mazaná tlakovým olejem. Spaliny, které opouští motor značnou rychlostí, projdou výfukovým potrubím a jsou vedeny na lopatkové kolo turbíny, kterému předávají část své energie. Přívod spalin je v radiálním směru na kolo turbíny a odvod spalin je ve směru axiálním. Nasávaný čerstvý vzduch o atmosférickém tlaku nejprve projde vzduchovým filtrem, aby byl zbaven prachu a případných nečistot. Poté je nasáván v axiálním směru do skříně kompresoru, kde je stlačen na požadovaný tlak. Při průchodu kompresorem se nasávaný vzduch zahřeje, což je z hlediska snahy dopravit do válce co nejvíce vzduchu nepraktické. Z toho důvodu je vzduch dále veden do mezichladiče stlačeného vzduchu, kde odevzdá část tepla a prochází dále do válce motoru. [3]



Obr. 5.1 Schéma přepřívání turbodmychadlem [9]

5.1 KONSTRUKCE TURBODMYCHADLA

Základní dělení turbodmychadel je podle míry stlačení vzduchu, které je požadováno, a to na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké. Další dělení je možné provést dle použitého typu rotorů a jejich uložení. Nejvíce využívaným typem je rotor s kluzným uložením mezi oběžnými koly, díky němuž lze dosáhnout vhodných rozměrů i hmotností. Vstupní hrdlo sání do kompresoru má zpravidla válcový tvar a hladký povrch. Na sání je připojeno sací potrubí a vzduchový filtr. Oběžné kolo kompresoru je umístěno ve spirální skříni vyrobené z hliníkové slitiny. Skříň může být v případě potřeby chlazena vodou. Na výstupu ze spirální skříně je umístěn bezlopatkový difuzor, zvyšující efektivitu proudícího vzduchu. Za ním následuje většinou i difuzor lopatkový. Výstupní hrdlo z kompresoru má válcový tvar. Oběžné kolo je vyrobeno přesným litím z hliníkové slitiny. Ve zvláštních případech vysokého namáhání může být vyráběno kování z titanu. Toto řešení je pro vysokou cenu málo využívané. Hřídel, na níž jsou umístěna oběžná kola je vyráběna z ušlechtilé oceli. Oběžné kolo kompresoru je s hřídelí spojeno rozebíratelně pomocí pera a zajištěno maticí. [4]



Obr. 5.2 Hřídel turbodmychadla s oběžnými koly [10]

Turbínové kolo je s hřídelí spojeno nerozebíratelně za pomoci třecího svařování. Vyráběno je metodou lití z žárupevných materiálů. Je třeba volit odpovídající materiál, aby byl schopen dlouhodobě snášet vysoké teploty dosahující až 850°C. Nejpoužívanější jsou slitiny na bázi kobaltu chromu a niklu. Aby bylo dosaženo požadovaného plnicího tlaku je třeba, aby turbodmychadlo pracovalo ve velmi vysokých otáčkách. Tyto otáčky mohou dosahovat v extrémních případech až 160 000 min⁻¹. Velmi důležitou součástí turbodmychadla je ložisková skříň, ve které je uložen rotor turbodmychadla. Na ložiska, ve kterých je rotor uložen jsou u turbodmychadel kladeny velmi vysoké nároky zejména co se týká dosahovaných otáček a tepelného namáhání. Velký důraz je také kladen na to, aby ložiska měla co nejmenší odpor, a tím se usnadnilo rychlé roztáčení turbodmychadla.

Nejjednodušším řešením je kluzné uložení. Vnitřní a vnější kroužek kluzného ložiska se vzájemně nedotýká a je mezi nimi určitá vůle, která se po nastartování motoru vymezi olejovým filmem. Materiály používané na tato ložiska musí mít velice malý koeficient tření. Výhodou tohoto řešení je poměrně nízká cena, dobré zástavbové rozměry. Mezi jeho nevýhody patří pomalejší rozběh turbodmychadla a nutnost řádného tlakového mazání neznečištěným olejem.



Obr. 5.2 Kluzná ložiska turbodmychadla [11]

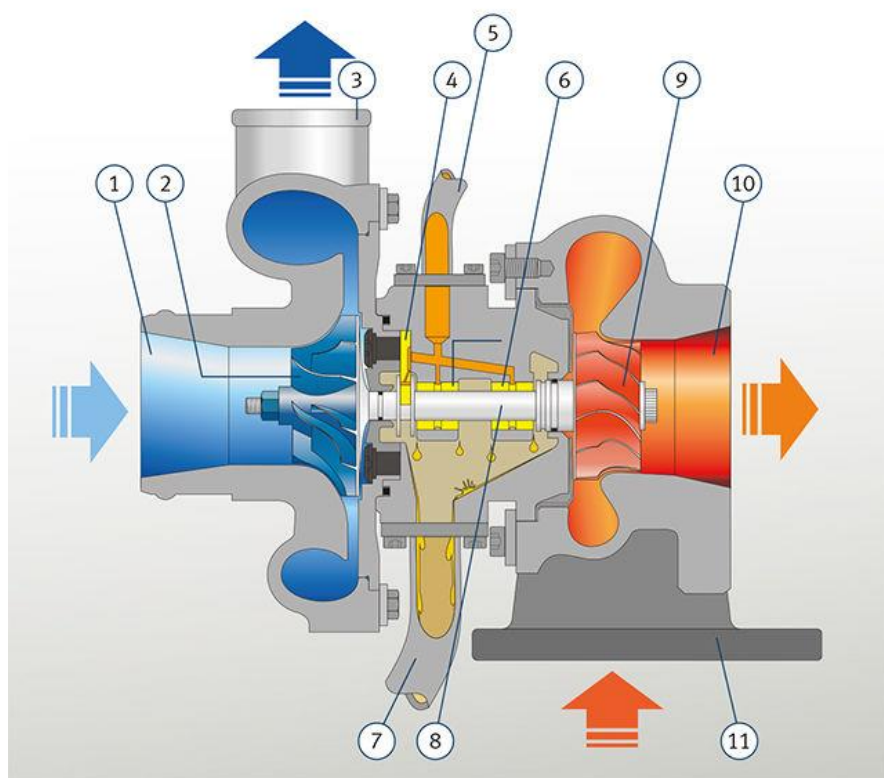
Další možností je uložení rotoru v kuličkových ložiscích, které je citelně náročnější na výrobu a je i značně dražší. Jeho výhody jsou ale nesporné, náběh turbodmychadla je znatelně rychlejší než v případě kluzného uložení. Celková životnost uložení v kuličkových ložiscích je vyšší.



Obr. 5.3 Kuličková ložiska turbodmychadla [11]

Pro zajištění správné funkce ložisek rotoru je nezbytné dostatečné mazání. Mazání je zajišťováno z mazacího okruhu motoru a musí být dimenzováno tak, aby byl zajištěn stálý a dostatečný tlak oleje. Nejvíce se využívá řešení, kdy je vstup oleje na horní straně ložiskové skříňe a výstup na straně spodní. Výstup mívá zpravidla větší průměr, pro zajištění bezproblémového odvodu oleje, který již prošel ložisky a má menší tlak. Turbodmychadla, která jsou více namáhána nebo jsou velmi výkonná musí být i dostatečně chlazena. Chlazení se realizuje připojením na chladicí systém motoru.

Předpokladem dlouhé životnosti turbodmychadla je i správné zacházení s motorem, který je turbodmychadlem vybaven. Nejjednodušší věc, kterou lze pro turbodmychadlo udělat je, že po delší, nebo svižnější jízdě není motor vypnut okamžitě, ale turbodmychadlo je necháno tzv. dochladit. Lze to provést buď klidnou jízdou, nebo ponecháním nastartovaného motoru nějakou chvíli na volnoběh, aby v turbodmychadle nedocházelo vlivem teploty k degeneraci oleje. Pokud tak není s turbodmychadlem zacházeno je zde nebezpečí, že se olej může připéct na stěny olejového vedení, tím mírně snížit jeho průřez a tím omezit průtok oleje. Nezbytností jsou i pravidelné výměny oleje v motoru, aby olej nebyl znečištěn a měl správné mazné vlastnosti. [4]

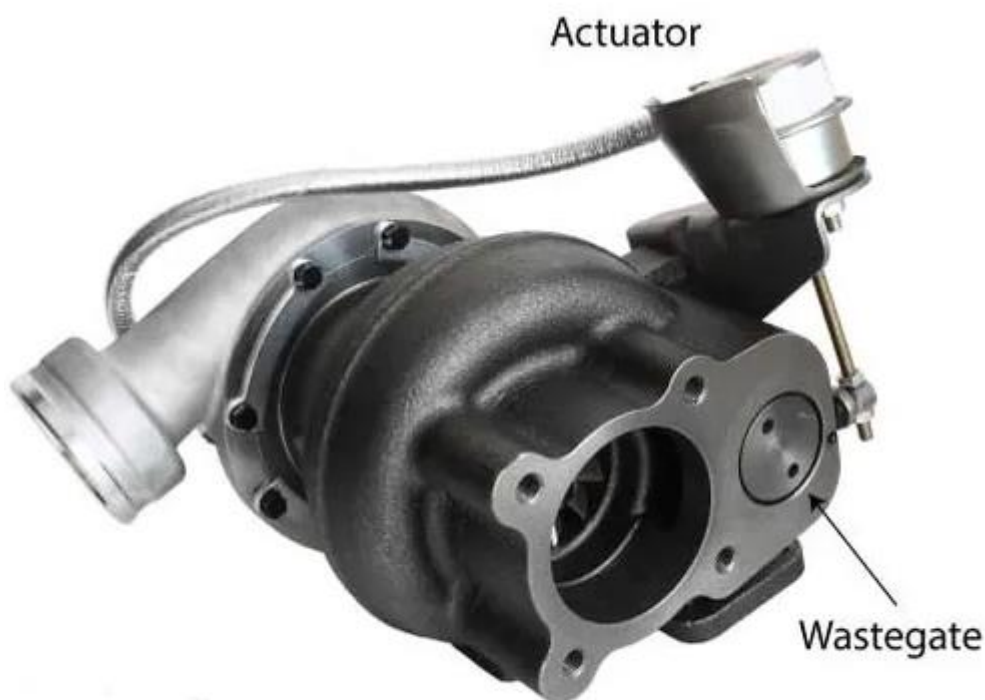


Obr. 5.4 Schéma mazání turbodmychadla [12]

1 - přívod vzduchu, 2 - kompresorové kolo, 3 - vývod stlačeného vzduchu, 4 - axiální ložisko, 5 - přívod oleje, 6 - kluzné ložisko, 7 - odvod oleje, 8 - hřídel rotoru, 9 - turbínové kolo, 10 - odvod výfukových plynů, 11 - přívod výfukových plynů

5.2 REGULACE

Turbodmychadlo je třeba regulovat z několika důvodů. Pro žádaný efekt přeplňování je třeba dodržet přesný hmotnostní tok plnicího vzduchu a správný tlak, což by bez použití regulace bylo velmi obtížné. Při nízkých otáčkách motoru, kdy je i proud spalín malý, by byl tok plnicího vzduchu malý. Naopak při vysokých otáčkách by průtok plnicího vzduchu do motoru byl až příliš velký. Jedním z možných řešení je odpouštění části již stlačeného vzduchu ze sání pomocí obtokového ventilu, v angličtině označovaného jako wastegate. Nejpoužívanějšími řešeními jsou obtékání části spalín za turbínu dmychadla a změna geometrie rozváděcích lopatek. Snahou všech konstrukčních řešení je i odstranit nežádoucí tzv. turboefekt, což je prodleva mezi sešlápnutím akcelérátoru a výkonovou odezvou od motoru. [4]



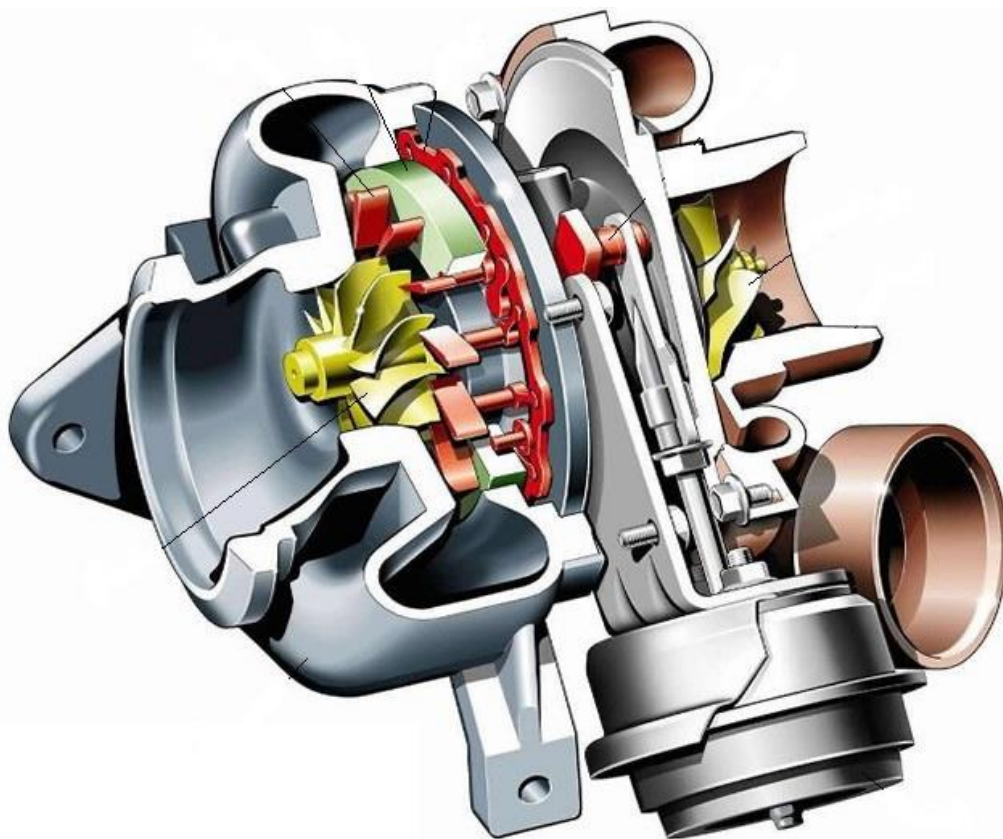
Obr. 5.5 Turbodmychadlo s regulací obtokovým ventilem [13]

5.2.1 REGULACE OBTOKOVÝM VENTILEM

Obtokový ventil, instalovaný mezi motorem a turbínou ve výfukovém systému, umožňuje regulaci plnicího tlaku. Při tomto způsobu regulace je část spalin vedena obtokem do výfukového systému. Tím se zmenší množství spalin, které roztáčí turbínu a zároveň dojde ke zmenšení celkového výkonu turbodmychadla. Obtokový ventil je řízen pomocí plnicího tlaku kompresoru. Talířový ventil je do svého sedla tlačěn pomocí pružiny. Sílu, kterou pružina působí na ventil lze seřizovat. Ventil je opřen o membránu, na kterou z její druhé strany působí tlak plnicího vzduchu. Ve chvíli, kdy síla, kterou působí plnicí vzduch na membránu, překoná sílu od předepjaté pružiny dochází k otevření ventilu, a tím k aktivaci obtokového kanálu. Pro snížení tepelného namáhání membrány od výfukových plynů lze použít konstrukční řešení, které nahrazuje talířový ventil klapkou, která je ovládána pomocí táhla. Tím pádem může být membrána umístěna ve větší vzdálenosti od horkých spalin. Další možností, jak řídit obtok spalin, je pomocí elektromagnetického ventilu, který je ovládán řídicí jednotkou motoru. [4]

5.2.2 REGULACE ZMĚNOU GEOMETRIE LOPATEK

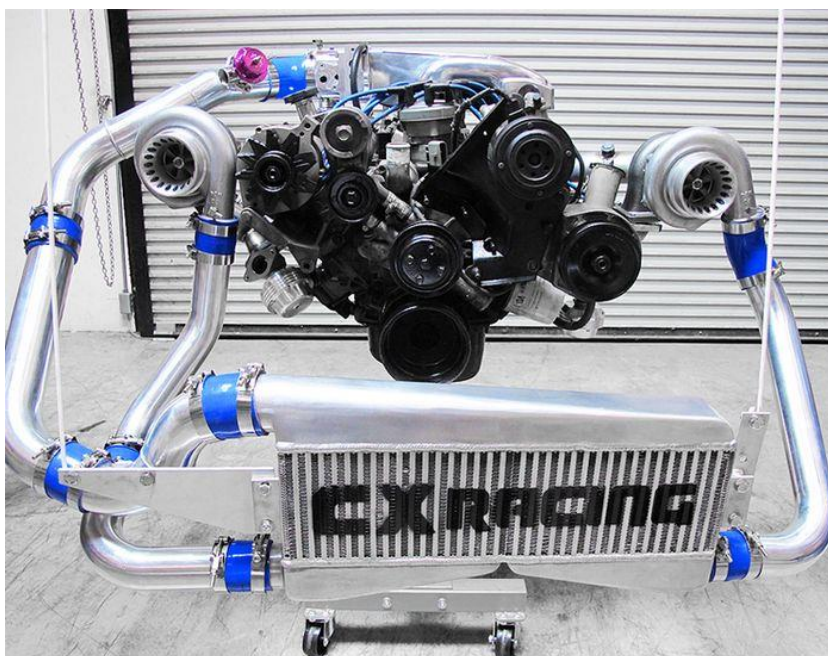
Dalším způsobem, kterým lze realizovat regulaci plnicího tlaku turbodmychadla je technologie nazývaná VGT, z anglického variable geometry turbocharger. Ve skříni turbodmychadla, kde je umístěno turbínové kolo jsou po jeho obvodu umístěny lopatky na čepech, kolem kterých se mohou otáčet. Lopatky jsou mechanicky spojeny s podtlakovým aktuátorem, který na základě podtlaku provádí jejich natáčení. V situaci, kdy jsou otáčky motoru i turbodmychadla malé, jsou lopatky uzavřeny. Spaliny, které prochází turbodmychadlem musí projít malou mezerou kolem lopatek, a tím se zvyšuje jejich rychlost. Zároveň jsou pomocí lopatek přesně směřovány na turbínové kolo. S rostoucími otáčkami motoru roste i rychlost výfukových plynů a lopatky se postupně přestavují do otevřené polohy, ve které nebrání výfukovým plynům v průchodu. Jedná se o konstrukci složitou a náchylnou na znečištění například karbonovými úsadami, které způsobují zatuhnutí lopatek. Zároveň je ovšem toto řešení velmi efektivní a účinné. [4]



Obr. 5.6 Turbodmychadlo s regulací pomocí variabilní geometrie lopatek [14]

6 CHLAZENÍ PLNÍČÍHO VZDUCHU

Jedním ze způsobů, kterými lze zlepšit parametry přepřňovaného motoru je chlazení plnícího vzduchu. Střední efektivní tlak závisí přímo na hustotě plnícího vzduchu z čehož plyne, že při stlačování vzduchu v turbodmychadle a při jeho ohřívání dochází ke zmenšování jeho hustoty, a tím i ke snižování středního efektivního tlaku, což není žádoucí. Řešením tohoto problému je vřazení chladiče stlačeného vzduchu mezi turbodmychadlo a sací potrubí motoru. Výsledné ochlazení stlačeného vzduchu je závislé na mnoha parametrech jako jsou například velikost chladiče, druh a vlastnosti chladicího média, a také na množství vzduchu který prochází chladičem. Snahou je ochladit vzduch na co možná nejbližší teplotu té, jakou měl vzduch před vstupem do sacího ústrojí.



Obr. 6.1 Přepřňovaný motore s chladičem stlačeného vzduchu [15]

Chlazení plnícího vzduchu se na motoru projevuje zvýšením jeho výkonu, který může vzrůst o 10 až 35 % v porovnání s motorem, u kterého nedochází k chlazení plnícího vzduchu. Další výhodou je menší závislost výkonu motoru na okolní teplotě. Dále dochází i ke snížení měrné spotřeby paliva. Zmenší se také tepelné a mechanické namáhání motoru, což má kladný vliv na jeho životnost.

V případě, že je uvažováno o vybavení motoru chlazením plnícího vzduchu, je třeba zohlednit i ekonomickou stránku věci. Aby se chlazení plnícího vzduchu vyplatilo, je nutné dosáhnout ochlazení alespoň o 20 %. Dále je třeba brát v úvahu, že instalaci chladiče dojde i ke snížení teploty výfukových plynů, což má za následek snížení objemového toku turbodmychadlem. Aby nedošlo k poklesu otáček turbíny, a tím ke snížení plnícího tlaku je třeba změnit

plochu rozváděcího ústrojí. Chladiče stlačeného vzduchu se používají v případě přepřínování turbodmychadly i mechanicky poháněnými kompresory. [2]

Systém chlazení plnicího vzduchu je náročný, co se týká zástavbového prostoru a umístění chladiče. Umístění chladiče v automobilu je závislé na tom, pomocí jakého média je vzduch ochlazován. První možností je chlazení náporovým vzduchem při jízdě. V takovém případě se chladič umísťuje například před vodní chladič motoru nebo na nějaké jiné místo, kde je dostatečný průtok náporového chladičového vzduchu. Druhou možností je chlazení vodou. V takovém případě je chladič připojen na chladičový okruh motoru a vodní čerpadlo musí být patřičně dimenzováno. Vodní chlazení je možné realizovat i vlastním chladičovým okruhem, který je nezávislý na chladičovém okruhu motoru. Materiály, které se na výrobu chladičů používají nejčastěji jsou teplotám odolné plasty a hliník.

7 PORUCHY TURBODMYCHADEL

Automobily, které jsou v současnosti vyráběny, jsou většinou vybaveny motory s přepřínáváním pomocí turbodmychadla. Proto je třeba se zajímat o jejich poruchy a příčiny těchto poruch. Závady, které se u turbodmychadel vyskytují jsou nejčastěji způsobeny nesprávným nebo nedostatečným mazáním nebo vnikem cizího tělesa. Aby turbodmychadlo spolehlivě a dlouho plnilo svoji funkci je třeba dbát na základní zásady jeho provozu, na které mnoho řidičů zapomíná. [23]

7.1 NEDOSTATEČNÉ MAZÁNÍ

Příčin vzniku této závady může být několik. Například zanedbání pravidelné výměny oleje v motoru. Olej pak již nemá mazné vlastnosti, jaké by měl mít, nebo je znečištěn. Tím dochází k nadměrnému opotřebení kluzného ložiska rotoru a vzniku vůlí mezi ložiskem a hřídelí. V případě, že tato vůle již dosáhne nadlimitní hodnoty, může dojít ke kolizi oběžného kola se skříní turbodmychadla. Tato kolize má poté za následek značné poškození lopatek oběžného kola.



Obr. 7.1 Poškozené oběžné kolo kompresoru [16]

Další možností poškození hřídele a ložiska turbodmychadla je vniknutí velkého a tvrdého smítka, které způsobí vydření ložiska, poškrábání hřídele a následně dojde opět ke vzniku radiální vůle. Kluzné ložisko je na tento druh poškození náchylnější než hřídel, je to způsobeno menší tvrdostí materiálu ložiska.



Obr. 7.2 Vydřená kluzná ložiska turbodmychadla [17]

Olej, který je pod tlakem do turbodmychadla dopravován nemá za úkol pouhé mazání hřídele a ložiska. Slouží také k ochlazování tohoto velmi tepelně namáhaného místa. Vlivem nedostatku oleje způsobeného například ucpanou mazací trubičkou, může dojít k nadměrnému zahřívání ložiska a hřídele. Zároveň bude v tomto místě docházet i k přehřívání oleje, který tím ztrácí své vlastnosti.



Obr. 6.3 Vydřená hřídel turbodmychadla [17]

7.2 VNIK CIZÍHO TĚLESA

Rotor turbodmychadla má při provozu velmi vysoké otáčky, a proto vnik i sebemenší částice do prostoru kompresorového nebo turbínového kola mívá fatální následky. Velký důraz musí být tedy kladen na čistotu vzduchu, který je do turbodmychadla nasáván. Vzduchový filtr je třeba měnit dle předepsaných intervalů, neboť zrníčka prachu nebo písku dokážou způsobit deformaci lopatek oběžných kol. Další možnou příčinou poškození turbodmychadla je kontakt s jakoukoliv uvolněnou částí motoru, (kousky pístních kroužků, částice karbonu) která může způsobit jeho destrukci. Předejít takové události lze pravidelným servisem a šetrným zacházením. [21]

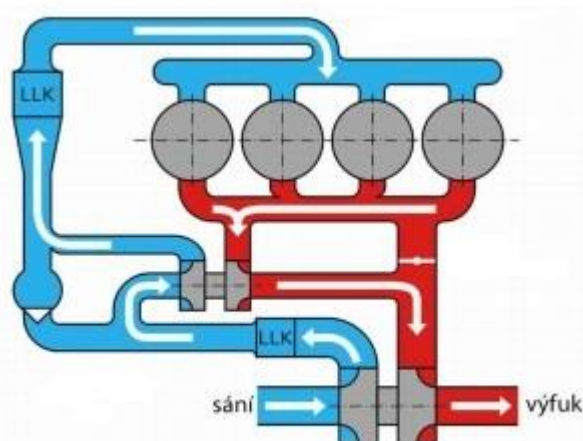


Obr. 7.4 Poškozený rotor turbodmychadla [18]

8 SPECIFICKÉ ZPŮSOBY PŘEPLŇOVÁNÍ

8.1 DVOUSTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ

Lepší jízdní charakteristiky, vyšší účinnosti a vyššího výkonu lze dosáhnout u přeplňovaných motorů použitím dvou turbodmychadel. Lze tím částečně odstranit tzv. turboefekt, neboli prodlevu mezi sešlápnutím plynového pedálu a výkonovou odezvou od motoru. Turbodmychadla bývají nejčastěji zapojena v sérii, ale může se vyskytovat i paralelní zapojení dmychadel. Zpravidla první a menší turbodmychadlo bývá vysokotlaké a za ním bývá připojeno turbodmychadlo druhé které je větší a je nízkotlaké. Menší dmychadlo má rychlejší odezvu při nízkých otáčkách, snadněji se roztáčí. Větší dmychadlo přichází na řadu v otáčkách vyšších.

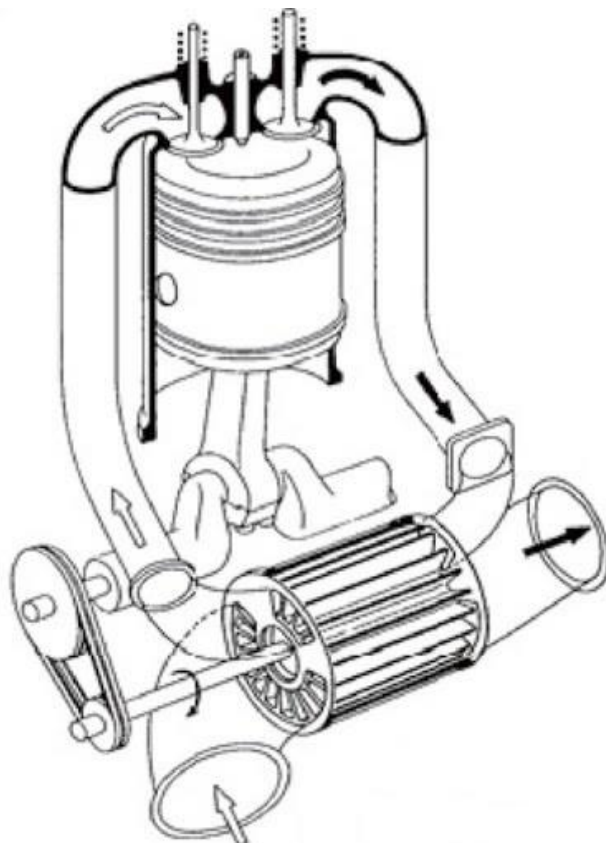


Obr. 8.1 Schéma přeplňování dvěma turbodmychadly [19]

Postupné přepínání mezi oběma dmychadly je řízeno pomocí regulační klapky, která je při nízkých otáčkách motoru do cca 1800 min^{-1} uzavřena a veškeré výfukové spaliny jdou přes malé vysokotlaké turbodmychadlo. S postupným zvyšováním otáček motoru dochází k otevírání této klapky a výfukové plyny roztáčí větší dmychadlo. Při otáčkách motoru cca nad 3000 min^{-1} je klapka zcela otevřena a většina výfukových plynů jde přes velké dmychadlo přes které mají snazší cestu. [2]

8.2 SYSTÉM COMPREX

Comprex je obchodní označení pro systém přeplňování, který v minulosti vyvíjela automobilka Mazda a použila jej v sériové výrobě. Systém funguje na principu tlakových vln mezi proudem spalin a proudem nasávaného vzduchu. Hlavní částí celé konstrukce je rotor, který je tvořen drobnými kanálky, ve kterých dochází k setkávání výfukových plynů s nasávaným vzduchem. Pohon rotoru je zajištěn pomocí řemene od klikové hřídele. Otáčky rotoru mohou dosahovat až $12\,000\text{ min}^{-1}$.



Obr. 8.2 Schéma systému Comprex [20]

Do kanálků rotoru vstupují výfukové plyny, rotor se otáčí a proud spalin, který do něj vstoupil, narazí na stator a otočí směr svého proudění. Otočením proudu v kanálku rotoru dojde ke vzniku podtlaku a ten nasaje vzduch. Další pootočení rotoru umožní otevření cesty nasátého vzduchu do sacího potrubí motoru. Do potrubí výfuku jsou následně odvedeny výfukové plyny společně s vyplachovacím vzduchem. Množství výfukových plynů, které se dostanou do sacího potrubí je velice malé, a to i přes skutečnost, že výfukové plyny nejsou nijak odděleny od nasávaného vzduchu. Proud stlačeného vzduchu je kontinuální díky velkému množství kanálků v rotoru. Systém má dobrou účinnost přeplňování již v malých pracovních otáčkách motoru. [2]

9 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl podán ucelený přehled možností přeplňování zážehových motorů používaných v osobních automobilech. Úvod byl věnován teoretickým základům, podle kterých lze popsat funkci zážehového motoru. Dále byla věnována pozornost možnostem, za pomoci, kterých lze zvyšovat výkon zážehových motorů s přihlédnutím k výhodám a nevýhodám uvedených řešení. Jako nejvýhodnější možnost jsem zvolil přeplňování. Stálé zpřísnování emisních norem má za následek, že atmosférické motory z nabídek automobilek pomalu mizí a nahrazují je motory přeplňované. Tyto jsou nejsnazší cestou, jak zatím splnit přísné požadavky. Následující kapitola byla věnována jednotlivým kompresorům, které jsou k přeplňování používány. Rootsovo a Lysholmovo dmychadlo jsou evropskými automobilkami využívány jen zřídka, což je způsobeno velkými nároky na výkon potřebný k jejich pohonu. Z toho důvodu jsou používány na motorech o větších zdvihových objemech, než jsou v Evropě běžné. Mnohem větší oblibě se těší u automobilek amerických. Nejvíce rozšířeným řešením je přeplňování pomocí turbodmychadla, které ke svému pohonu využívá energii výfukových plynů. Neodebírání tím nijak zásadní část výkonu motoru, proto je vhodné i pro použití v motorech o menším zdvihovém objemu. Turbodmychadlu, jeho konstrukci, principu a hlavním součástí je věnována samostatná kapitola. Velmi důležitá pro funkci turbodmychadla je regulace jeho výkonu. Ta je prováděna pomocí obtokového ventilu, který je konstrukčně jednoduchý, nebo pomocí variabilní geometrie lopatek, která poskytuje přesnější regulaci a dokáže zmírnit i prodlevu turbodmychadla. Závěr této práce je věnován nejčastějším závadám, které mohou u turbodmychadla nastat a způsobům, jimiž je možné jim předcházet. Zmínka je věnována i specifickým způsobům přeplňování, a to použití více turbodmychadel, nebo systému Comprex, který se i přes některé své výhody nerozšířil. Budoucnost spalovacích motorů vzhledem k současné situaci nevypadá příliš optimisticky. Osobně doufám, že výhod a požitků z jízdy, které dokáže nabídnout právě jen spalovací motor, si budeme všichni moci dopřát ještě dlouhá léta.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] STONE, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Fourth Edition. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. 516 s. ISBN 978-1-137-02829-5.
- [2] BARTONÍČEK, Ladislav. *Přepřínování pístových spalovacích motorů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-7083-800-0.
- [3] HOFMAN, Karel. *Turbodmychadla a vozidlové turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1981.
- [4] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 5. vyd. Brno: Avid, 2008. ISBN 978-80-87143-06-3.
- [5] What are superchargers. *MechStuff* [online]. 10 January 2019 [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <https://mechstuff.com/how-superchargers-work-types-advantages-limitations/>
- [6] *Rootsovo dmýchadlo*. Doleček, Josef., Holoubek, Zdeněk. *Strojnictví II pro SOU*. 3. vydání. Praha: SNTL – NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1989. 165 s. ISBN 80-03-00036-X.
- [7] Superchargers. *Eaton* [online]. 2019 [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <http://www.eaton.in/EatonIN/ProductsServices/Vehicle/ProductsServices/Superchargers/index.htm>
- [8] How Superchargers work. *How stuff work* [online]. 2021 [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/supercharger.htm#pt3>
- [9] Princip turbodmychadla. *Flexamiauto* [online]. 2021 [cit. 2021-4-9]. Dostupné z: <https://www.flexamiauto.cz/teorie/>
- [10] New turbo rotor. *Turboturbos* [online]. 2021 [cit. 2021-4-9]. Dostupné z: <https://turboturbos.com/collections/rotor-assembly/products/r-0062>
- [11] Journal bearing vs ball bearing. *Hybridturbos* [online]. 2018 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://www.hybridturbos.com/technical/journal-vs-ball-bearing>
- [12] Oil consumption. *MSmotorservice* [online]. 2020 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://www.ms-motorservice.com/en/technipedia/post/oil-consumption-caused-by-unfavourable-operating-conditions-for-turbocharger/>
- [13] Turbocharger wastegate. *Freeasestudyguides* [online]. 2021 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.freeasestudyguides.com/engine-turbocharger-wastegate.html>
- [14] Variable geometry turbocharger. *X-engineer* [online]. 2021 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/variable-geometry-turbocharger-vgt/>

- [15] How intercoolers add power. *Carthrottle* [online]. 2017 [cit. 2021-4-22]. Dostupné z: <https://www.carthrottle.com/post/how-intercoolers-add-power-and-why-you-need-one/>
- [16] Lubrication related. *Turbo* [online]. 2018 [cit. 2021-4-22]. Dostupné z: <https://www.turbo.com.sg/damage-analysis.html>
- [17] Cause of failure. *Zekiturbo* [online]. 2018 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.zekiturbo.com/cause-of-failure/>
- [18] 7 ways to kill a turbo. *Drivingline* [online]. 9 January 2017 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.drivingline.com/articles/7-ways-to-kill-a-turbo-and-how-to-avoid-them/>
- [19] Dvoustupňové přeplňování. *Katedra vozidel a motorů TU Liberec* [online]. 2012 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: [http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1786/PZP-8p%C5%99\(2012\).pdf](http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1786/PZP-8p%C5%99(2012).pdf)
- [20] Pressure wave supercharger. *Wikimedia* [online]. 2020 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:US4563997_Fig1_Presurewave_Supercharger.png
- [21] Nejčastější závady turbodmychadel. *Janoušek-motorsport* [online]. 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.janousek-motorsport.cz/caste-dotazy/nejcastejsi-zavady-turbodmychadel/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

V_z	[m ³]	Zdvihový objem
V_k	[m ³]	Kompresní objem
ε	[-]	Kompresní poměr
ψ	[-]	Stupeň zvýšení tlaku při kompresi
κ	[-]	Poissonova konstanta
δ	[-]	Stupeň expanze
Q_d	[J]	Dodané teplo
Q_o	[J]	Odevzdané teplo
m	[kg]	Hmotnost
c_v	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita za konstantního objemu
T	[°C]	Teplota
p	[Pa]	Tlak
v	[-]	Stupeň zvýšení tlaku při izochorickém přívodu tepla
η	[-]	Účinnost
P_e	[W]	Efektivní výkon
i	[-]	Počet válců
n	[Hz]	Otáčky motoru
τ	[-]	Otáčkový činitel